Vol.12, No.3, Fall 2023, pp.255-271 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2022.74643.1151 Open access

Estimation of Maximum Horizontal Acceleration of Earthquakes in Kerman Province using Probability Method

Mehrdad Baluch[a], Majid Nemati[b*], MohammadHossein Bagheripour[c]

[a] *Professor in Seismology, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran*
[b] *PhD Candidate in Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran*
[a] *Professor in Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran*

Received: 10 December 2021 Revised: 15 February 2022 Accepted: 20 February 2022

Abstract

Considering devastating events like the 2003 Bam earthquake (M_w~6.6), it is essential to develop up-to-date earthquake hazard maps to design structures in this area. In this study, a seismic catalog including historical and instrumental events was compiled and then 21 seismic sources were identified in Kerman province and its surrounding. Seismicity parameters were estimated for all 21 source zones and an attenuation relationship was selected to obtain local site effect-based seismic hazard maps. Finally, seismic hazard maps, which is one of the basic requirements of seismic design and seismic regulations, were presented in form of the peak ground acceleration (PGA) measures for the return period of 475 and 2475 years, and the high risk areas in Kerman Province were introduced. To investigate the depth of events on Iranian plateau, according to the studies conducted in this study, it is suggested to use only the data obtained from local seismic networks. The results were presented as seismic hazard maps for the parameters of maximum intensity of horizontal ground acceleration, taking into account construction effects with a probability of 2% and 10% over 50 years for all parts of Kerman province to provide all design needs according to 2800 regulations. Using the obtained maps, the earthquake parameter in the Iranian Seismic Code (Code 2800) can be updated. Results showed that, as expected, two areas in Kerman province are with the highest accelerations: The first is the Kuhbanan-Golbaf-Bam fault systems with a northwest-southeast trend and the second is the northeast termination of Zagros toward Makran. Both of these ranges are seismic and of great importance in seismic surveys. These areas include Kuhbanan-Golbaf-Bam fault systems and Jiroft-Kahnooj.

Keywords: Peak Ground Acceleration, Hazard Map, Earthquake, Hazard, Kerman Province

---

* .Corresponding author: Majid Nemati Email: nematimajid_1974@uk.ac.ir Tel:+989125253641

How to cite this Article: Balucha, M., Nemati, M., & Bagheripour, M. (2023). Estimation of maximum horizontal acceleration of earthquakes in Kerman province using probability method. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(3), 255-271.
DOI:10.22067/geoeh.2022.74643.1151

Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
Geography and Environmental Hazards
Volume 12, Issue 3 - Number 47, Fall 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74643.1151

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شمارهٔ چهل و هفتم، پاییز ۱٤۰۲، صص ۲۷۱-۲۵۵

مقاله پژوهشی

برآورد بیشینه شتاب افقی زمین‌لرزه با به‌کارگیری تحلیل احتمالاتی در استان کرمان

مهرداد بلوچ- کارشناسی ارشد عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان
مجید نعمتی[1]- استاد زلزله‌شناسی دانشکده علوم و مرکز پژوهشی زلزله دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
محمدحسین باقری‌پور- استاد مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۹/۱۹ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۰/۱۱/۲٦ تاریخ تصویب: ۱٤۰۰/۱۲/۱

چکیده

با وجود رخدادهای ویرانگری همچون زمین‌لرزه سال ۲۰۰۳ بم $(M_W{\sim}6.6)$، تدوین نقشه‌های خطر زمین‌لرزه به‌روز برای طراحی سازه‌ها در این گستره بسیار ضروری است. در این بررسی که یک پژوهش با نتایج کاربردی در زمینه مهندسی زمین‌لرزه است، یک کاتالوگ لرزه‌ای شامل رخدادهای تاریخی و دستگاهی تدوین شده و سپس ۲۱ منبع لرزه‌زا در گستره شهرهای استان کرمان و اطراف آن شناسایی شد. پارامترهای لرزه‌خیزی برای تمامی ۲۱ چشمه تخمین زده شده و یک مدل پیوند کاهیدگی مناسب برای این گستره برای به‌دست آوردن نقشه‌های خطر زمین‌لرزه با در نظرگیری اثرات ساختگاهی گزینش شد. در پایان، نقشه‌های خطر زمین‌لرزه که یکی از اساسی‌ترین نیازهای طراحی لرزه‌ای و آیین‌نامه‌های لرزه‌ای است، در قالب پارامتر بیشینه شتاب زمین برای دوره بازگشت‌های ٤۷۵ و ۲٤۷۵ سال ارائه شده و گستره‌های پرخطر لرزه‌ای در استان کرمان معرفی شدند. این گستره‌ها شامل نوار کوهبنان-گلباف-بم و گستره جیرفت-کهنوج است.

---

۱ نویسنده مسئول:۰۹۱۲۵۲۵۳٦٤۱ Email: nematimajid_1974@uk.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

بلوچ، مهرداد؛ نعمتی، مجید؛ باقری پور، محمدحسین؛ ۱٤۰۲. برآورد بیشینه شتاب افقی زمین‌لرزه با به‌کارگیری تحلیل احتمالاتی در استان کرمان. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲(۳). صص ۲۷۱-۲۵۵
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74643.1151

کلیدواژه‌ها: بیشینه شتاب زمین، نقشه خطر زمین‌لرزه، تحلیل خطر زمین‌لرزه، استان کرمان.

۱- مقدمه

طبق رکوردهای دستگاهی و تاریخی ثبت شده در گستره کرمان از سال ۱۸٥٤ تاکنون یک رخداد $M_w \geq 7.0$، ١٤ رخداد $6.0 \leq M_w < 7.0$ دستگاهی، ٥ رخداد $5.5 \leq M_s < 6.5$ تاریخی (میرزایی و همکاران، ۱۹۹۷) در این گستره رخ داده است. لرزه‌خیزی بالای استان کرمان سبب خسارات جانی و مالی زیادی طی دهه‌های گذشته شده است. نخستین رخداد تاریخی ثبت شده در این گستره، زمین‌لرزه $M_w\sim6.1$ سال ۱۸٦٤ چترود است که به دلیل نزدیکی آن به شهر کرمان باعث مرگ بسیاری شده و خرابی‌های فراوانی به بار آورد (آمبراسیس و ملویل، ۱۹۸۲). زمین‌لرزه‌های ۱۹۱۱ راور با بزرگای $M_w\sim6.2$، ۱۹۲۳ لاله‌زار با بزرگای $M_w\sim6.7$، و ۱۹ زرند با بزرگای $M_w\sim5.9$ به‌شماره ۷۰۰، ۲۰۰، و ٦٦٥ ربانی داشته و خسارات قابل‌توجهی به شهرهای نزدیک وارد کردند (آمبراسیس و ملویل، ۱۹۸۲). در سال ۲۰۰۳ زمین‌لرزه با بزرگای $M_w\sim6.6$ بم باعث یکی از فجیع‌ترین سوانح طبیعی در ایران و گستره کرمان شد. طبق گزارش‌های رسمی، این زمین‌لرزه بیش از ۲٦۰۰۰ کشته، ۳۰۰۰۰ زخمی و ده‌ها هزار نفر بی‌خانمان برجای گذاشت و شهر بم را به‌طور کامل تخریب کرد. آخرین تلفات قابل‌توجه مربوط به یک زمین‌لرزه در این گستره مربوط به زمین‌لرزه زرند با بزرگای $M_w\sim6.4$ است که ٦۰۰ کشته و ۱٤۰۰ مجروح برجای گذاشت (بربریان، ۲۰۰۵). زمین‌لرزه سال ۲۰۱۰ ریگان با بزرگای $M_w\sim6.5$ (واکر[1] و همکاران، ۲۰۱۳ و نعمتی، ۲۰۱۵)، و زمین‌لرزه سال ۲۰۱۷ شهداد با بزرگای $M_w\sim6.1$ (سوویج[2] و همکاران، ۲۰۱۹؛ نعمتی[3] و همکاران، ۲۰۲۰) آخرین رخدادهای برجسته این گستره هستند که خوشبختانه خسارات جانی و مالی قابل‌توجهی نداشتند.

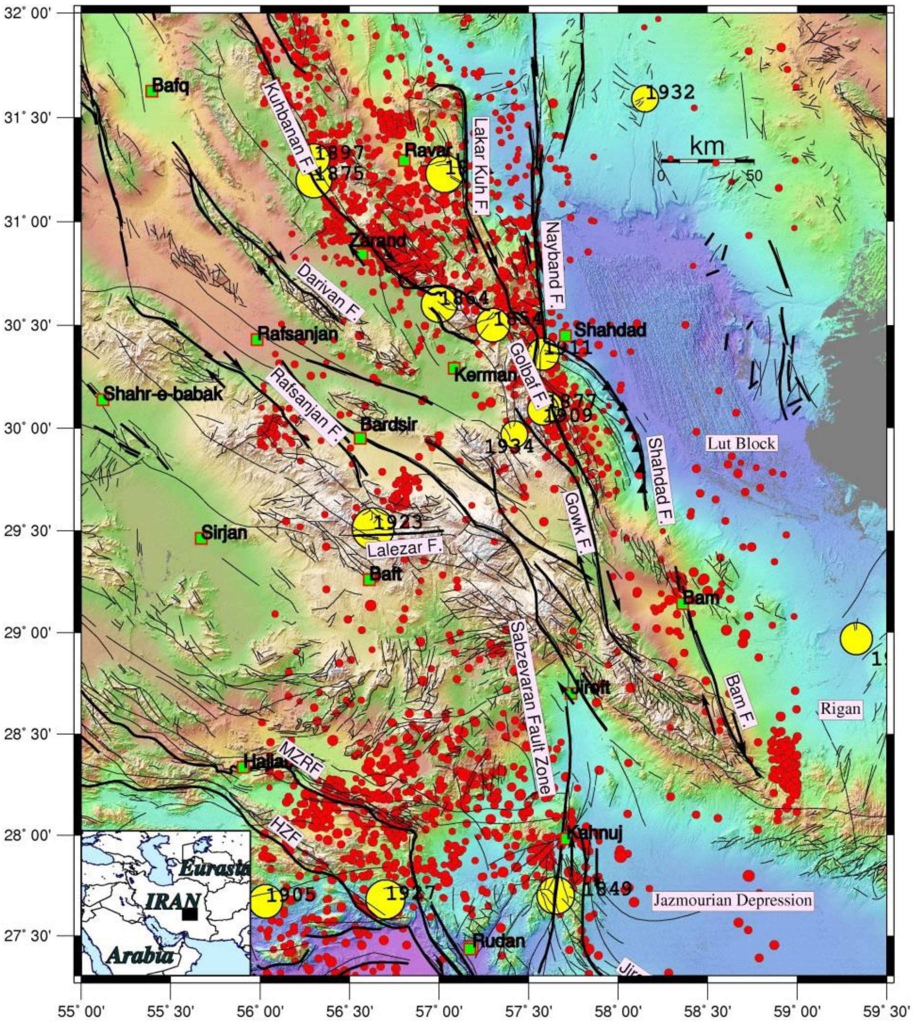
حاشیه باختری بلوک لوت که بخشی از آن در خاور استان کرمان جای دارد، زمین‌لرزه‌های ویرانگر تاریخی و دستگاهی بسیاری را تجربه کرده است. در این سامانه لرزه‌خیز به درازای نزدیک به ۲۰۷ کیلومتر، ۱۳ زمین‌لرزه از سال ۱۹۷۷ تا ۲۰۲۰ دارای گسیختگی سطحی بوده‌اند (رشیدی و همکاران، ۲۰۱۹) که نشان از اهمیت این گستره دارد. یکی از این گسل‌ها گسل گلباف است که زمین‌لرزه‌های آن در چرخه لرزه‌ای و به گمان پس از یک نبود لرزه‌ای روی می‌دهند (نعمتی و درخشانی، ۲۰۲۰). باختر استان کرمان نیز گسل‌هایی دارد که باوجود لرزه‌خیزی کم می‌توانند خطرآفرین باشند. گسل انار یکی از آن‌ها است که به طول ۲۰۰ کیلومتر در مرکز ایران جای دارد. بررسی‌های لرزه‌شناسی گذشته روی این گسل نشان می‌دهد که این گسل به پایان چرخه لرزه‌ای خود نزدیک شده و به گمان میزبان یک زمین‌لرزه بزرگ خواهد بود (مهرابی و همکاران، ۲۰۲۱). جنوب استان به دلیل داشتن زمین‌لرزه‌های ژرف‌تر از ژرفای میانگین پوسته قاره‌ای (تا ٤٥ کیلومتر) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (رشیدی و همکاران، ۲۰۲۰). از دیگر

1 Walker
2 Savidge
3 Nemati

گسـل‌های مهم که تمام یا بخشـی از گسـل در چشـمه‌های لرزه‌ای جای دارد، می‌توان از گسـل جیرفت، سـبزه‌واران، سروستان، کوهبنان، لکرکوه، نای‌بند، شهداد، انار، رفسنجان، داوران و بم نام برد.

تحلیل خطر زمین‌لرزه می‌تولند به‌عنوان یکی از لایه‌های اطلاعاتی برای پیش‌بینی زمین‌لرزه به‌کار رود، اگرچه، هدف اصـلی بسـیاری از تحلیل‌های مهندسـی زمین‌لرزه بررسـی تاب‌آوری سـازه‌ها در برابر زمین‌لرزه اسـت. توکلی و غفوری آشتیانی[1] (۱۹۹۹) یکی از اولین نقشه‌های خطر لرزه‌ای ایران را با تعریف ۲۰ منبع لرزه‌ای در قالب بیشینه شتاب افقی[2] با احتمال فراگذشـت[3] ۱۰ ٪ در ۵۰ سـال ارائه نمود. معین فر[4] (۲۰۱۲) نقشـه بیشـینه شـتاب افقی‌ایران با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله را با استفاده از تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای به دست آورد.این نقشه برای مرکز پژوهش‌ها راه و شـهرسـازی[5] و جهت اسـتفاده در آیین‌نامه لرزه‌ای ایران (اسـتاندارد ۲۸۰۰) توسـعه داده شـده اسـت. درواقع ویژگی این پژوهش در تفاوت در چگونگی گزینش چشـــمه‌های لرزه‌ای و توجه به جنبه مهندســـی و کاربردی بررســـی خطر زمین‌لرزه برای ساخت‌وسازها است.

1 Tavakoli and Ghafory-Ashtiany
2 Peak Ground Acceleration
3 Exeedance Probability
4 Moeinfar
5 Building and Housing Research Center (BHRC)



شکل ۱- نمایی از لرزه‌خیزی تاریخی (نشان‌گرهای زردرنگ) و دستگاهی (نشان‌گرهای قرمزرنگ) به همراه شهرها و گسل‌های اصلی (خم‌های پررنگ) و فرعی (خم‌های کم‌رنگ) استان کرمان. زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی، به‌شماره از آمبراسیس و ملویل، (۱۹۸۲) و موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران هستند.

یزدانی و کوثری (۲۰۱۳) با استفاده از تئوری بیز و محصولی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش اعتمادپذیری[1]، تاکنون نقشه‌های خطر لرزه‌ای متعددی برای ایران پیشنهاد کرده‌اند.

1 Reliability Method

۲- مواد و روش

ازآنجایی‌که اثرات زمین‌لرزه‌های آینده را نمی‌توان دقیقاً مشخص کرد، تنها با روش‌های بررسی خطر مانند روش احتمالاتی می‌توان تا اندازه‌ای این اثرات را بررسی نمود. تحلیل خطر زمین‌لرزه شامل تحقیقات و روش‌هایی است که به کمک آن‌ها می‌توان اثرات زمین‌لرزه‌های آینده را در ساختگاه برآورد نمود. این اثرات شامل پارامترهای حرکتی زمین است. در گذشته به دلیل نبود دستگاه‌های لرزه‌نگاری و ابزارهای اندازه‌گیری جنبش زمین، از پارامتر شدت زمین‌لرزه استفاده می‌شد. پس از گسترش فناوری ابزارهای ثبت اطلاعات جنبش زمین، از بیشینه شتاب زمین (Peak Ground Acceleration, PGA)در مطالعات تحلیل خطر استفاده شد. بیشینه سرعت زمین (Peak Ground Velocity, PGV) و بیشینه جابجایی زمین(Peak Ground Displacement, PGD) و همین‌گونه شتاب طیفی (Spectrum Acceleration, SA)در پریودهای مختلف سازه‌ها، مثال‌هایی از پارامترهای سنجش جنبش زمین در سال‌های گذشته است.

فرآیند تحلیل خطر لرزه‌ای شامل مراحل زیر است:

- شناسایی منابع لرزه‌ای[1]
- تخمین پارامترهای لرزه‌ای[2]
- انتخاب مدل‌های پیش‌بینی کننده حرکت زمین[3]
- محاسبه منحنی‌های خطر لرزه‌ای[4]

در بررسی خطر زمین‌لرزه به روش قطعی بایستی بیشینه بزرگای مورد انتظار (M_{max}) زمین‌لرزه در چشمه‌های لرزه‌ای برآورد گردد. یک مدل تجربی کاهیدگی جنبش نیرومند زمین برای برآورد اثر زمین‌لرزه در ساخت‌گاه به‌کار برده می‌شود. در این راستا، کوتاه‌ترین فاصله منبع تا ساخت‌گاه انتخاب شده در رابطه تجربی قرار داده می‌شود. در مقابل، روش خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی، احتمال اینکه یک اندازه‌گیری پارامتر جنبش زمین یک مقدار خاصی باشد را تخمین می‌زنند. در این روش، یک پیوند کاهیدگی برای برآورد تضعیف پارامتر حرکت زمین به کار برده می‌شود. شکل عمومی یک پیوند کاهیدگی ($\text{Log}(Y) = a + F1(M) + F2(R) + F3(S) + \varepsilon$) بوده که در آن، (Y) پارامتر مورد نظر جنبش زمین است که مستقیماً با بزرگای (M) و به‌طور عکس با فاصله (R) پیوند دارد. ضرایب ثابت این رابطه به گونه تجربی با به کارگیری روش‌های آماری و از روی موج شتاب نگاشت‌ها یا لرزه‌نگارها محاسبه می‌شوند.

1 Seismic Source Zones
2 Seismcity Parameters
3 Ground Motion Peredictive Models
4 Seismic Hazard Curves

کلیات روش تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی را که در چهار گام بیان شده است، هر یک همانندی‌هایی با گام‌های پروسه تحلیل خطر لرزه‌ای تعینی (قطعی) دارند.

گام نخست، شناسایی و مشخص سازی منابع زمین‌لرزه، همانند گام اول روش تعینی، با این تفاوت که توزیع احتمالاتی نواحی گسیختگی[1] محتمل درون منبع نیز بایستی مشخص شوند. در بسیاری از موارد توزیع‌های احتمالاتی یکنواخت[2] برای هر یک از منابع لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود که براین دلالت دارد که احتمال رخداد زمین‌لرزه در هر یک از نقاط منبع یکسان است. سپس، این توزیع‌ها با هندسه منبع ترکیب می‌شوند تا توزیع احتمال متناسب با فاصله سایت از منبع به‌دست آید. روش تعینی به گونه ضمنی فرض می‌کند که احتمال رخداد زمین‌لرزه در نزدیک‌ترین نقاط هر منبع به سایت مورد نظر ۱ و احتمال دیگر نقاط صفر است. چشمه‌های لرزه‌ای بر پایه مواردی که در لرزه‌زمین‌ساخت مهم هستند، تعیین شده است. این موارد شامل درازای گسل‌ها راستا و سازوکار آن‌ها، پراکندگی زمین‌لرزه‌ها و مرزهای لرزه‌زمین‌ساختی می‌شود.

در گام بعدی بایستی لرزه‌خیزی یا توزیع موقتی تکرار زمین‌لرزه مشخص شود. یک رابطه تکرار[3] که نرخ میانگین تجاوز یک زمین‌لرزه از یک بزرگا را نشان می‌دهد، برای مشخص کردن لرزه‌خیزی هر یک از منابع استفاده می‌شود. رابطه تکرار ممکن است بیشینه بزرگا زمین‌لرزه را اصلاح سازد اما برخلاف روش تعینی هیچ‌گونه محدودیتی برای بزرگای آن زمین‌لرزه درنظر نمی‌گیرد.

در این گام بایستی فرض را براین گذاشت که حرکت ایجاد شده در زمین با هر بزرگایی و در هر نقطه از منبع محتمل است و بایستی با استفاده از پیوند پیش‌بینی کننده محاسبه شود. در یک تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی عدم قطعیت ذاتی[4] در پیوند پیش‌بینی کننده نیز درنظرگرفته می‌شوند.

درنهایت، عدم قطعیت‌های محل وقوع زمین‌لرزه، بزرگای زمین‌لرزه و عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی پارامترهای حرکت زمین ترکیب می‌شوند تا احتمال تجاوز پارامترهای حرکت زمین طی یک بازه زمانی مشخص به‌دست آید. عملکرد صحیح یک تحلیل احتمالاتی نیازمند توجه دقیق به مسائلی همچون ویژگی‌های منبع[5] و پیش‌بینی پارامترهای حرکت زمین و هم‌چنین توجه به مکانیک محاسبات احتمالاتی است.

پهنه‌های گسلی نقش مهمی در تجزیه‌وتحلیل خطر لرزه‌ای ایفا کرده و بیش‌تر بر پایه قضاوت کارشناسان انتخاب می‌شوند. چگونگی ترسیم منابع لرزه‌ای تأثیر زیادی بر عدم قطعیت در تحلیل خطر لرزه‌ای دارد. یکی دیگر از مشکلات تجزیه‌وتحلیل خطر لرزه‌ای نحوه ارتباط زمین‌لرزه با گسل است (قاسمی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۱). آن‌ها در

1 Rupture Area
2 Uniform Probability Distribution
3 Recurrence Law
4 Inherent Uncertainty
5 Site Properties

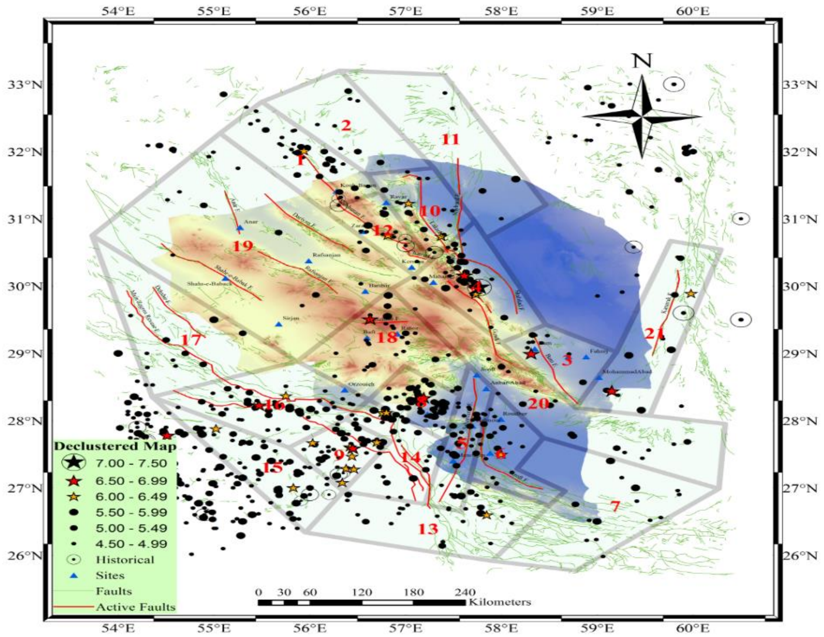
الگوریتم خود برای تحلیل خطر زمین‌لرزه در استان کرمان برای بهینه‌سازی داده‌های ورودی، دو تابع هدف را کمینه کردند: فاصله رویدادها از گسل‌ها و فاصله تا مراکز خوشه رویدادها. رویدادها با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی و با خطاها مرتبط شدند. مقایسه نتایج الگوریتم اعمال شده و زمین‌لرزه‌های شناخته شده و مستند، دقت ۷۵٪ را برای استان کرمان هنگام تعیین گسل مربوطه برآورد نمودند.

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

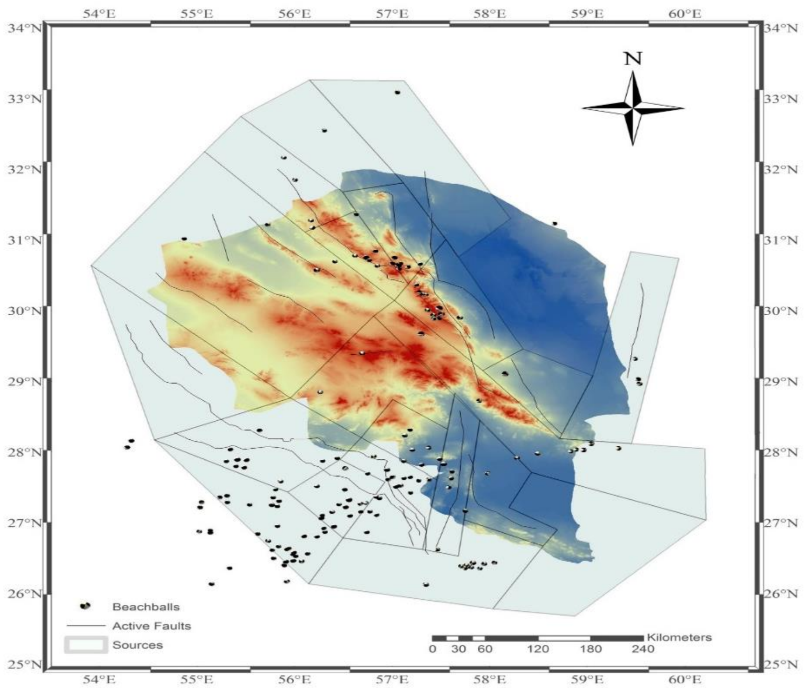
استان کرمان (26-32° N, 54-60° E) یکی از لرزه‌خیزترین نواحی‌ایران به‌شمار می‌آید که از جنوب باختر در نزدیکی محل برخورد دو صفحه تکتونیکی عربی و اوراسیا واقع شده است (نگاره ۱). داده‌های زمین‌لرزه‌های رخداده در استان کرمان و خارج از استان تا فواصل حداقل ۱۰۰ کیلومتر فراتر از مرزهای این استان شامل تاریخ رخدادها، زمان رخدادها، موقعیت جغرافیایی، بزرگا و ژرفای زمین‌لرزه که بیش‌تر از تارنمای موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران[1] تهیه شده است (نگاره آ ۲). داده شتاب‌نگاشت‌های[2] مرکز پژوهش‌ها راه و شهرسازی که از شتاب‌نگارهای[3] راه‌اندازی شده در این استان به‌دست آمده‌اند. سازوکار کانونی[4] زمین‌لرزه‌ها (نگاره ب ۲) که از تارنمای دانشگاه هاروارد آمریکا (GCMT) تهیه شده و داده‌های اثرات ساختگاهی گستره که از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) تهیه شدند.

1 Iranian Seismological Centre
2 Accelerograph
3 Accelerometer
4 Focal Mechanism

آ)



ب)



شکل ۲ آ) چشمه‌های لرزه‌ای شناسایی شده و گسل‌های اصلی (خم‌های قرمز) و زمین‌لرزه‌های هر چشمه و ب) سازوکار زمین‌لرزه‌های هر چشمه.

۲-۲- روش انجام پژوهش

نرم‌افزار ArcGIS شامل Arcmap و Arcscene این دو نرم‌افزار به‌عنوان نرم‌افزارهای اصلی برای تدوین نقشه‌های خروجی و پهنه‌بندی لرزه‌ای[1] استفاده شدند. نرم‌افزار Surfer به جهت تهیه برخی از فایل‌های خام برای انجام تحلیل‌ها استفاده شد. نرم‌افزار Excel برای رسم برخی از نمودارها و تدوین کاتالوگ‌های لرزه‌ای[2] و نظم دهی داده‌ها استفاده شد. نرم‌افزار ZMap جهت بررسی بزرگای کامل‌شدگی[3] کاتالوگ لرزه‌ای به کمک روش حل انحنای بیشینه[4] استفاده شد. از نرم‌افزار Kijko برای به‌دست آوردن برخی از پارامترهای لرزه‌خیزی استفاده شد. از جدیدترین ورژن نرم‌افزار R-CRISIS که مربوط به سال ۲۰۲۰ است، برای انجام تحلیل اصلی استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار MATLAB بسیاری از فایل‌های خام مورد نیاز برای تحلیل تولید شده و پیوند کاهیدگی گوناگون با توجه به مقالات، توسعه داده شد. از نرم‌افزار Focal 3D Mechanism برای رسم سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های گوناگون استفاده شد. نرم‌افزار Notepad++ نیز برای تهیه فایل‌های خام ورودی برای انجام تحلیل استفاده شد.

جدول ۱- پیوند استفاده شده برای تبدیل بزرگاهای گوناگون به بزرگای گشتاوری برای دست‌یابی به کامل‌ترین کاتالوگ لرزه‌ای.

شماره	معادله تبدیل	بازه بزرگا	سنجه
(۳-۱)	$M_w = 0.739M_N + 1.41$	$3.5 < M_N < 6.3$	M_N
(۳-۲)	$0.67(\pm0.005)M_S + 2.07(\pm0.03)$	$3 \leq M_S < 6.2$	M_S
(۳-۳)	$M_w = M_s$	$M_S \geq 6.2$	
(۳-۴)	$M_w = 0.85(\pm0.04)m_b + 1.03(\pm0.23)$	$3.5 \leq m_b \leq 6.2$	m_b

مختصات و اطلاعات تمامی زمین‌لرزه‌های استان کرمان تا فاصله کمینه ۱۰۰ کیلومتر از مرزهای این استان، گسل‌های اصلی و فرعی، زمین‌لرزه‌های تاریخی و دیگر داده‌های مورد نیاز از منابع گوناگون استخراج شده و ترسیم شدند. با سنجش داده‌های کاتالوگ‌های لرزه‌ای گوناگون داخلی مانند موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES ،IRSC) و خارجی مانند نهاد لرزه‌نگاری جهانی (USGS ،ISC، GCMT و ...) و هم‌آمیخت آن‌ها بهترین کاتالوگ لرزه‌ای ممکن برای انجام پژوهش تدوین شد (جدول ۱). با انتقال داده‌های کاتالوگ به نرم‌افزار ArcGIS موقعیت تمامی زمین‌لرزه‌ها تعیین شد. سپس، سازوکار کانونی گسل‌های گستره

1 Seismic Microzonation
2 Seismic Catalog
3 Compeleteness Magnitude
4 Maximum Curvature Solution

تعیین شد. چشمه‌های لرزه‌ای بالقوه گستره با توجه به موقعیت گسل‌ها، سازوکار کانونی و موقعیت زمین‌لرزه‌ها، شناسایی شد. چگونگی گزینش و مرزبندی چشمه‌های لرزه‌ای درهرصورت در هر پژوهشی که انجام می‌شود، نسبت به کارهای دیگر به‌ناچار تا اندازه‌ای متفاوت خواهد بود. درکل، این چشمه‌ها با توجه به کارهای همانندی که در ایران برای بررسی خطر زمین‌لرزه انجام شده است (مانند نعمتی، ۲۰۱۸، 2019)، بر پایه برخی ویژگی‌ها گزینش می‌شوند. این ویژگی‌ها شرایط زمین‌ساختی؛ راستا، درازا، سازوکار و اهمیت گسل‌ها؛ لرزه‌خیزی گستره، راستا و پهنای رشته‌کوه‌ها و مرز آن‌ها با دشت‌ها (که بیش‌تر گسل هستند) انجام می‌شود. در این مرحله، با استفاده از داده‌های کاتالوگ تدوین شده و با کمک نرم‌افزار Zmap و Excel بزرگای کامل‌شدگی رخدادهای گستره به‌دست آمد.

در این مرحله بایستی پارامترهای لرزه‌ای گستره برآورد می‌شد. این پارامترها با کمک نرم‌افزار Kijko محاسبه شده و در جدول ۲ آمده‌اند. مدل‌های پیش‌بینی‌کننده جنبش زمین (GMPMs) مناسب برای گستره، از مقالات گوناگون انتخاب شده و برای به‌کارگیری، به‌عنوان فایل‌های ورودی نرم‌افزار R-CRISIS توسعه داده شد. در پایان، تحلیل‌های لازم انجام شده و خروجی‌های لازم از نرم‌افزار گرفته شده نقشه‌های پایانی ترسیم شده و صحت سنجی بر روی آن‌ها صورت پذیرفت.

جدول ۲- پارامترهای لرزه‌ای تعیین شده برای منابع لرزه‌ای.

منبع لرزه‌ای	M_{min}	M_{max}	$\lambda_{4.5}$	a	b	$\sigma(b)$
1	4.5	6.7	0.74	4.91	1.12	0.05
2	4.5	5.8	0.21	3.82	1.00	0.06
3	4.5	7.1	0.26	4.05	1.03	0.06
4	4.5	7.7	0.66	4.14	0.96	0.05
5	4.5	6.4	0.67	4.37	1.01	0.06
6	4.5	6.6	0.26	4.10	1.04	0.05
7	4.5	6.0	0.29	4.01	1.01	0.06
8	4.5	7.1	1.13	4.82	1.06	0.05
9	4.5	7.2	0.88	4.17	0.94	0.05
10	4.5	6.7	0.33	4.15	1.03	0.05
11	4.5	6.3	0.10	3.50	1.00	0.05
12	4.5	6.9	0.26	4.00	1.02	0.05
13	4.5	6.7	0.44	4.28	1.03	0.06
14	4.5	6.7	0.63	4.16	0.97	0.05
15	4.5	6.7	0.97	4.58	1.02	0.05
16	4.5	7.0	1.07	4.93	1.09	0.05
17	4.5	6.3	0.24	3.97	1.02	0.05

منبع لرزه‌ای	M_{min}	M_{max}	$\lambda_{4.5}$	a	b	$\sigma(b)$
18	4.5	7.2	0.50	4.38	1.04	0.05
19	4.5	5.7	0.19	3.82	1.01	0.06
20	4.5	5.8	0.45	4.38	1.05	0.06
21	4.5	7.5	0.27	3.71	0.95	0.05

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، برای بررسی بزرگای کامل‌شدگی، با به‌کارگیری نمودار ستونی سال در مقابل بزرگای رخدادهای بزرگ‌تر از ٤/٠ و طبق روش انحنای بیشینه، بزرگای کامل شدگی، ٤/٥، ٤/٩ و ٥/٨ به‌شماره، برای بازه‌های زمانی ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰، ۱۹٦۰ تا ۲۰۲۰ و ۱۹۹٦ تا ۲۰۲۰ به‌دست آمد. همان‌گونه که از برآوردها پیداست، طبیعتاً این بزرگاها در گذر زمان و با تکمیل و پیشرفت شبکه‌های لرزه‌نگاری کوچک و کوچک‌تر می‌شوند. پس از شناسایی چشمه‌های لرزه‌ای، تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی، حذف پس‌لرزه و پیش‌لرزه‌های کاتالوگ و بررسی کامل‌شدگی کاتالوگ، نقشه‌های خطر لرزه‌ای ترسیم شدند.

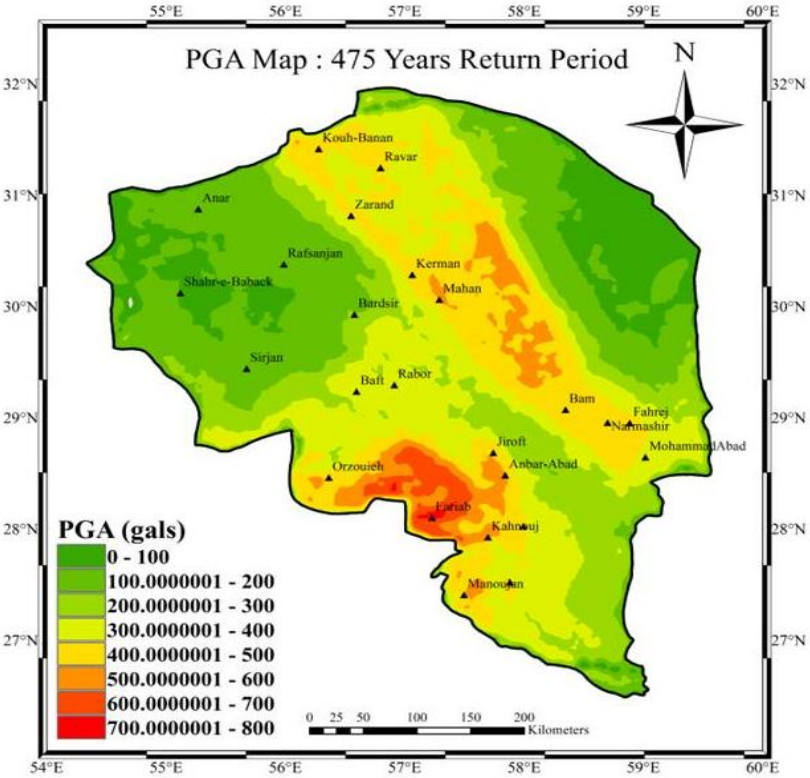
۳-۱- بررسی خطر لرزه‌ای

نقشه‌های خطر لرزه‌ای یکی از اساسی‌ترین نیازهای آیین‌نامه‌های لرزه‌ای به‌شمار می‌آیند؛ بنابراین به‌روزرسانی این چنین نقشه‌هایی سبب افزایش قابلیت اطمینان طراحی‌های لرزه‌ای خواهند شد. نتایج این نقشه‌ها می‌توانند برای اولویت‌بندی برنامه‌ریزی، استراتژی و سیاست‌های شهری مورد استفاده قرار گیرند (نگاره‌های ۳ و ٤). در این پژوهش تا حد امکان سعی شد تا عدم قطعیت‌های موجود در هر یک از گام‌های تحلیل خطر، شامل تصحیح‌سازی کاتالوگ، شناسایی چشمه‌های لرزه‌ای، تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده حرکت زمین کاهش داده شوند. الگوریتم توسعه داده شده برای تدوین کاتالوگ در این پژوهش را می‌توان جهت کاهش عدم قطعیت‌ها برای تدوین کاتالوگ‌هایی استفاده نمود که داده اصلی آن‌ها از مرکز لرزه‌نگاری کشوری تهیه می‌شوند. در این پژوهش برای افزایش دقت تحلیل، چشمه‌های لرزه‌ای شناسایی شده تا حد امکان نسبت به پژوهش‌ها انجام شده پیشین در این گستره با دقت بالاتری و در ابعاد کوچک‌تری شناسایی شدند. در شناسایی آن‌ها پنج معیار لرزه‌خیزی، گسل‌ها، سازوکار کانونی، شرایط زمین‌شناسی و داده کافی در هر چشمه لرزه‌ای (به‌عنوان عامل محدودکننده) تأثیر داده شدند. سپس، بزرگای کمینه و عدم قطعیت‌های پیوند تبدیل بزرگا در بزرگاهای پایین به‌عنوان منابع ایجاد خطا در طی تحقیق شناسایی شدند که بایستی در پژوهش‌های مجزا با جزییات بیش‌تر بررسی شوند. در پایان، با ترکیب نتایج مدل‌های گوناگون پیش‌بینی کننده حرکت زمین، با استفاده از مدل هایبرید به جای درخت منطق، به دلیل ترکیب

مدل‌های پیش‌بینی کننده قبل از انجام تحلیل و ایجاد مدل جدید بر پایه مدل‌های برگزیده، زمان انجام تحلیل تا چندین برابر کاهش یافته است.

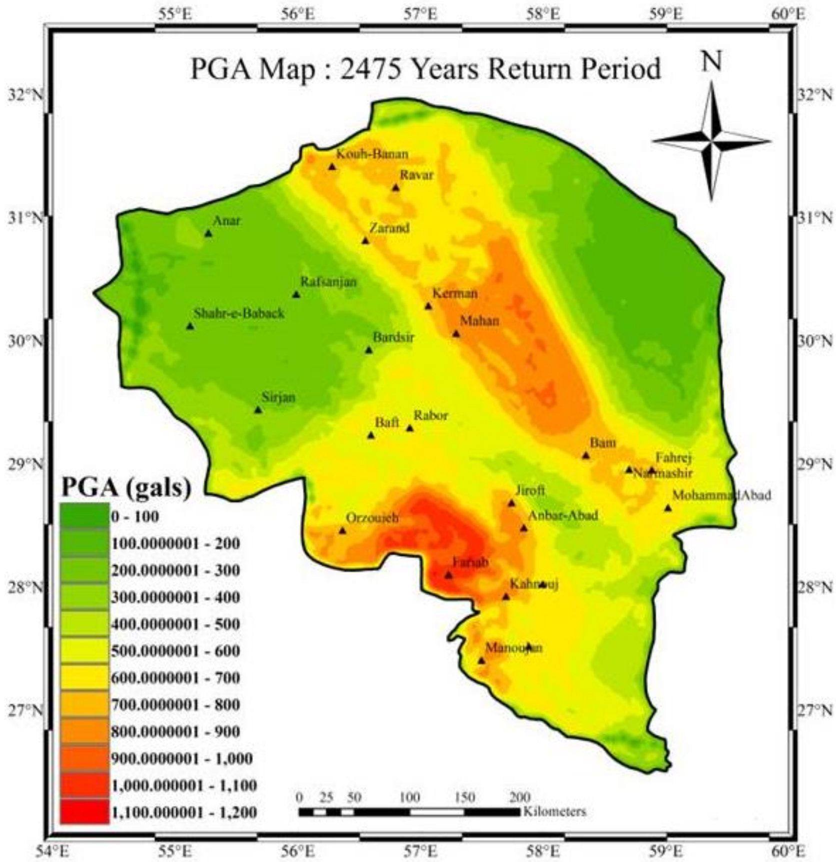
با مقایسه نتایج این بررسی و بررسی خطر زمین‌لرزه در استان کرمان با روش‌های دیگر مانند روش AHP که در آن گستره شهرهای با خطر لرزه‌ای خیلی زیاد (نوار شمال، شمال باختری کرمان و گسل‌های جیرفت و سبزه‌واران)، گستره‌هایی با خطر متوسط (جنوب خاوری و شمال باختری کرمان) تا گستره‌های کم‌خطر (سیرجان، باختر استان، لوت و جازموریان) شناخته شده‌اند، (اخلاص‌پور و همکاران، ۱٤۰۰) و در این پژوهش همانندی‌هایی وجود دارد. شهرهایی مانند زرند، کهنوج، جیرفت، اورزوئیه، قلعه‌گنج، راور، کرمان در هردو پژوهش در گستره پرخطر جای می‌گیرند.

حسن‌زاده و همکاران، (۱۳۹۰) با روش تحلیلی بیشینه شتاب شهر کرمان را ناشی از ۱۵ تکه گسلی درون و پیرامون شهری تا ۰/۲ اندازه g تخمین زده‌اند، درحالی‌که این اندازه در این پژوهش تا ۰/۵ g نیز می‌رسد. این اختلاف می‌تواند به دلیل استفاده از گسل‌های ناحیه‌ای و گستره بزرگ‌تر این نوشتار باشد.



شکل ۳- نقشه خطر لرزه‌ای بیشینه شتاب افقی با دوره بازگشت ٤۷۵ ساله برای سنگ‌بستر.

در نگاره ۳، نقشه‌های خطر لرزه‌ای با احتمال فراگذشت ۲ ٪ و ۱۰ ٪ در ۵۰ سال برای پارامتر شدت بیشینه شتاب افقی با میرایی ۵ ٪ درصد با دقت $0.06° \times 0.06°$ و با در نظرگیری اثرات ساختگاهی آورده شده است. این برآورد برای به‌دست آوردن بیش‌ترین هم‌خوانی با آیین‌نامه لرزه‌ای ۲۸۰۰ است. مقادیر حداکثر برای بیشینه شتاب افقی با دوره بازگشت ٤۷۵ ساله (نگاره ۳) برای شهرهای پرجمعیت استان کرمان شامل کرمان، جیرفت، سیرجان، رفسنجان و بم به‌شماره، g ۰/۵، g ۰/۵، g ۰/۲، g ۰/۲ و g ۰/۵ تخمین زده شد.



شکل ٤- نقشه‌های خطر لرزه‌ای بیشینه شتاب افقی با دوره بازگشت ۲٤۷۵ ساله برای سنگ‌بستر.

بیشینه PGA افقی زمین با همین دوره بازگشت در این پژوهش 0.8 g تخمین زده شد که مربوط به شهر فاریاب است. این شهر در نزدیکی محل برخورد دو پهنه زمین‌ساختی اوراسیا و عربی واقع شده است. کمینه PGA افقی با همین دوره بازگشت نیز مربوط به گستره غیرمسکونی دشت لوت و شهر انار است که به‌شماره مقادیر شتاب آن‌ها برابر با 0.1 g و 0.15 g می‌باشند. بیشینه PGA افقی با دوره بازگشت ۲٤۷۵ ساله (نگاره ٤) برای شهرهای کرمان،

جیرفت، سیرجان، رفسنجان و بم به‌شماره، 0.8 g، 0.8 g، 0.4 g، 0.3 g و 0.8 g تخمین زده شد. کمینه و بیشینه پارامتر شدت PGA افقی با همین دوره بازگشت به ترتیب 0.1g و 1.2 g است که به‌شماره، وابسته به گستره غیرمسکونی دشت لوت و شهر فاریاب می‌باشند.

٤- جمع‌بندی

در این پژوهش تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای استان کرمان بررسی شده بر عدم قطعیت‌های موجود در مراحل گوناگون تحلیل تأکید شده است. به دلیل اینکه کاتالوگ‌های لرزه‌ای مستقیماً بر پارامترهای لرزه‌خیزی تأثیر می‌گذارند، برای ایجاد یک کاتالوگ لرزه‌ای یکپارچه برحسب بزرگای گشتاوری، یک الگوریتم برای تبدیل بزرگا پیشنهاد شد که می‌توان از آن برای تدوین کاتالوگ‌هایی که بیش‌تر از داده‌های موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استفاده می‌برند، برای تمامی کشور استفاده نمود. چشمه‌های لرزه‌ای بر پایه چهار معیار لرزه‌خیزی، گسل‌ها، شرایط زمین‌شناختی و سازوکار کانونی مدل شدند. معمولاً در روش‌های مختلف، این ویژگی‌ها اندکی متفاوت است. شرایط زمین‌ساختی؛ راستا، درازا، سازوکار و اهمیت گسل‌ها؛ لرزه‌خیزی گستره، راستا و پهنای رشته‌کوه‌ها و مرز آن‌ها با دشت‌ها (که بیش‌تر گسل هستند) در اینجا درنظر گرفته شده‌اند. داده‌های کافی برای تخمین پارامترهای لرزه‌خیزی در هر چشمه لرزه‌ای به‌عنوان یک معیار مهم برای مدل‌سازی چشمه‌ها شناسایی شد که چشمه‌ها را محدود می‌سازد. سه عامل عدم حذف صحیح پیش‌لرزه و پس‌لرزه‌ها از کاتالوگ لرزه‌ای، استفاده از پیوند تبدیل بزرگای نامناسب یا استفاده از چندین پیوند کاهیدگی برای تبدیل یک رخداد به بزرگای گشتاوری و تشخیص ناصحیح کامل شدگی کاتالوگ که از مهم‌ترین عوامل ایجاد عدم قطعیت در محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی می‌باشند، شناسایی شدند. علاوه براین، انتخاب یک بزرگای حداقل کوچک به‌عنوان یکی دیگر از عوامل مؤثر در برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی شناسایی شد. پس از بررسی کامل‌شدگی کاتالوگ، سه بازه سال‌های ۱۹۰۰ تاکنون، ۱۹۶۰ تاکنون و ۱۹۹۵ تاکنون به‌عنوان بازه‌های کامل‌شدگی برای برآورد بزرگای کامل شدگی در این تحقیق شناسایی شدند که می‌توان از این سه بازه برای تعیین کامل شدگی کاتالوگ در سرتاسر گستره ایران‌زمین استفاده نمود. برای بررسی ژرفای رخدادها در فلات ایران، طبق بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، پیشنهاد می‌شود تنها داده به دست آمده از شبکه‌های لرزه‌نگاری بومی‌استفاده شود.

نتایج این پژوهش به‌عنوان نقشه‌های خطر لرزه‌ای برای پارامترهای شدت بیشینه شتاب افقی زمین و با در نظرگیری اثرات ساختگاهی با احتمال فراگذشت ۲٪ و ۱۰٪ در ۵۰ سال برای تمامی استان کرمان ارائه شد تا تمامی نیازهای طراحی بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ را فراهم آورد. با استفاده از نقشه‌های به‌دست آمده در این پژوهش می‌توان پارامتر زمین‌لرزه طرح ارائه شده در آیین‌نامه لرزه‌ای‌ایران (آیین‌نامه ۲۸۰۰) را به‌روزرسانی کرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، دو گستره در استان کرمان با بیش‌ترین شتاب‌ها نشان داده شده‌اند؛ گستره

نخست، گستره گسلی کوه‌بنان-گلباف- بم با روند شمال‌باختری- جنوب خاوری بوده و گستره دوم پایانه شمال خاوری گستره برخوردی زاگرس به مکران است. هردو این گستره‌ها لرزه‌خیز بوده و از اهمیت زیادی دز بررسی‌های لرزه‌ای برخوردار هستند. از نظر مساحت، PGA با دوره بازگشت ۲٤۷٥ سال گستره بیش‌تری را با شتاب‌های بالا پیش‌بینی می‌نماید. PGA در کلان‌شهر کرمان که در استان دارای اهمیت بیش‌تری است و هم‌چنین شهرهای بم، کوه‌بنان، ماهان، جیرفت، راور و ارزوئیه، اگرچه در نقشه با دوره بازگشت ۲٤۷٥ سال دارای شتاب g ۷/۸–۰/۰ است، در نقشه با دوره بازگشت ٤۷٥ در گستره شتاب g ٤/٥–۰/۰ جای گرفته است. شاید بتوان دلیل این تغییر را در درازای دوره بازگشت به‌کار برده شده درنظر گرفت.

با مقایسه نتایج این بررسی و بررسی خطر زمین‌لرزه در استان کرمان با روش‌های دیگر مانند روش AHP و در این پژوهش همانندی‌هایی وجود دارد. شهرهایی مانند زرند، کهنوج، جیرفت، اورزوئیه، قلعه‌گنج، راور، کرمان در هردو پژوهش در گستره پرخطر جای می‌گیرند. با مقایسه یک روش تحلیلی دیگر که در آن بیشینه شتاب شهر کرمان ناشی از ۱٥ تکه گسلی درون و پیرامون شهری ۰/۲ اندازه g تخمین زده شده، با روش این پژوهش که تا g ۰/٥ نیز می‌رسد، پی می‌بریم که این اختلاف می‌تواند به دلیل استفاده از گسل‌های ناحیه‌ای و گستره بزرگ‌تر در این نوشتار باشد.

پیشنهادها

نویسندگان این پژوهش پیشنهاد می‌کنند که برای طراحی لرزه‌ای سازه‌هابا کمک آیین‌نامه لرزه‌ای ۲۸۰۰ از زمین‌لرزه طرح ارائه شده در این پژوهش بهره گرفته شود؛ زیرا که نقشه خطر لرزه‌ای استفاده شده در تدوین آیین‌نامه ۲۸۰۰ از دقت بسیار پایینی برخوردار است و بایستی در ویرایش‌های بعدی این آیین‌نامه به‌روزرسانی شود.

کتابنامه

اخلاص پور، پ؛ عباس‌نژاد، ا؛ نعمتی، م؛ ۱٤۰۰. استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه استان کرمان. *مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*. دوره ۱۷. شماره ۳۳. بهار و تابستان ۱٤۰، ۷۳–٦۹.

حسن‌زاده، ر؛ عباس نژاد، ا؛ علوی، ا؛ شریفی تشنیزی، ا؛ ۱۳۹۰. تحلیل خطر لرزه‌ای شهر کرمان با تأکید بر کاربرد GIS در ریز پهنه‌بندی مقدماتی درجه ۲. *علوم زمین*. ۲۱(۸۱), ۲۳–۳۰ .

Ambraseys, N. N., & Melville, C. P., 2005. A history of Persian earthquakes. Cambridge university press, p 240, www.Cambridge.org/.

Berberian, M., 2005. The 2003 Bam urban earthquake: a predictable seismotectonic pattern along the western margin of the rigid Lut Block, southeast Iran. Earthq. Spectra. 21 (S1), S35–S99.

Ghasemi Nejad, Rezvan, Rahim Ali Abbaspour, Masoud Mojarab, (2021. Associating earthquakes with faults using cluster analysis optimized by a fuzzy particle swarm

optimization algorithm for Iranian provinces, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 140, 106433, https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106433/.

Mahsuli, M., Rahimi, H., & Bakhshi, A., 2019. Probabilistic seismic hazard analysis of Iran using reliability methods. Bulletin of Earthquake Engineering, 17(3), 1117-1143.

Mehrabi, A.; Pirasteh, S.; Rashidi, A.; Pourkhosravani, M.; Derakhshani, R.; Liu, G.; Mao, W.; Xiang, W., 2021. Incorporating Persistent Scatterer Interferometry and Radon Anomaly to Understand the Anar Fault Mechanism and Observing New Evidence of Intensified Activity. Remote Sens. 13, 2072. https://doi.org/10.3390/rs13112072.

Mirzaei, N., Gao, M., Chen, Y., Wang, N., 1997. A uniform catalog of earthquakes for seismic hazard assessment in Iran. Acta Seismologica Sinica, 10, 713–726.

Moinfar, A. A., Naderzadeh, A., & Nabavi, M. H., 2012. New Iranian seismic hazard zoning map for new edition of seismic code and its comparison with neighbor countries. In 15th World conference on earthquake engineering (15th WCEE, LISBOA, 2012-09-24 - 2012-09-28.

Nemati, M., 2015. Aftershocks investigation of 2010 Dec. and 2011 Jan. Rigan earthquakes in the southern Kerman province, SE Iran. Journal of Tethys (Iran), 3(2): 96-113.

Nemati, M., 2018. Probabilistic View of Occurrence of Large Earthquakes In Iran. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 29(3), 241-252.

Nemati, M., 2019. Inter-event times between large earthquakes in Iran. Earthquake Sciences, 32: 1-18.

Nemati, M., Hajati, F. J., Rashidi, A., & Hassanzadeh, R., 2020. Seismology of the 2017 Hojedk earthquakes (MN 6.0–6.1), Kerman province, SE Iran. Tectonophysics, 780, 228398. Nemati, M., 2015c. Aftershocks investigation of 2010 Dec. and 2011 Jan. Rigan earthquakes in the southern Kerman province, SE Iran. Journal of Tethys (Iran), 3(2): 96-113.

Nemati, M. and Derakhshani, R., 2020. Short-term seismicity patterns along the most active faults in Iran", 47, 441-459.

Savidge, E., Nissen, E., Nemati, M., Karasözen, E., Hollingsworth, J., Talebian, M., ... & Rashidi, A., 2019. The December 2017 Hojedk (Iran) earthquake triplet—sequential rupture of shallow reverse faults in a strike-slip restraining bend. Geophysical Journal International, 217(2), 909-925.

Ahmad Rashidi, Mohamad Mahdi Khatib, Faramarz Nilfouroushan, Reza Derakhshani, Seyed Morteza Mousavi, Hossein Kianimehr, Yahya Djamour., 2019. Strain rate and stress fields in the West and South Lut block, Iran: Insights from the inversion of focal mechanism and geodetic data, Tectonophysics, 766, 94-114.

Ahmad Rashidi, Mohammad-Reza Abbassi, Faramarz Nilfouroushan, Shahram Shafiei, Reza Derakhshani, Majid Nemati., 2020. Morphotectonic and earthquake data analysis of interactional faults in Sabzevaran Area, SE Iran, Journal of Structural Geology, https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104147.

Tavakoli, B. and Ghafory-Ashtiany, M., 1999. Seismic Hazard Assessment of Iran, Annali di Geophysica, Vol. 42, 6, Dec. 1999, https://doi.org/10.4401/ag-3781.

Walker, R. T., Bergman, E. A., Elliott, J. R., Fielding, E. J., Ghods, A. R., Ghoraishi, M., ... & Talebian, M., 2013. The 2010–2011 South Rigan (Baluchestan) earthquake sequence and its implications for distributed deformation and earthquake hazard in southeast Iran. Geophysical Journal International, 193(1), 349-374.

Yazdani, A., & Kowsari, M., 2017. A probabilistic procedure for scenario-based seismic hazard maps of Greater Tehran. Engineering Geology, 218, 162-172.

Building and House Research Center (BHRC), accelerometry network, http://www.bhrc.ac.ir/, 2020 .

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), http://www.iiees.ac.ir/, 2020.
Harvard University, Department of Geological Sciences, Global Centroid Moment Tensor catalogue (GCMT). available online at: http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html/, 2020.
International Seismological Center, ISC, http://www.isc.ac.uk/, 2020.
Institute of Geophysics University of Tehran, IGUT, http://irsc.ut.ac.ir/, 2020.
United State Geological Survey, USGS, http://www.neic.usgs.gov/, 2020.